

ZAŠTITNI UREĐAJI I SELEKTIVNOST U PODSUSTAVIMA ISTOSMJERNOG RAZVODA I NAPAJANJA PROTECTION DEVICES AND SELECTIVITY IN DC POWER DISTRIBUTION SUB-SYSTEMS

Javor Škare – Miroslav Mesić, Zagreb, Hrvatska

Podsustavi istosmjernog razvoda i napajanja bitne su sastavnice elektroenergetskih postrojenja budući da omogućavaju izvršavanje vitalnih funkcija postrojenja u normalnom pogonu i u slučaju nestanka mrežnog napona te stoga trebaju biti pouzdan i siguran izvor napajanja električnom energijom.

S obzirom da se način prekidanja istosmjerne struje znatno razlikuje od prekidanja izmjenične struje, važno je da se prilikom projektiranja podsustava istosmjernog razvoda i napajanja u elektroenergetskim postrojenjima vodi briga o njihovoj specifičnosti. Dobrim odabirom zaštitnih uređaja (niskonaponskih rastalnih osigurača i prekidača) i njihovim pravilnim rasporedom po zaštitnim razinama razvoda postiže se selektivnost zaštite. U ovom radu su prezentirani osnovni tipovi zaštitnih uređaja i mogućnost njihove upotrebe u podsustavima istosmjernog razvoda i napajanja te načini postizanja selektivnosti zaštite.

DC power distribution sub-systems are essential components of electrical power facilities since they allow the carrying out of vital facility functions in normal operation even in the event of a collapse in grid voltage. Therefore, such systems should be a reliable and safe source of electrical power. When taking into consideration that the manner of terminating DC current is significantly different from terminating AC current, it is important that, when designing DC power distribution sub-systems in electrical power facilities, care be taken concerning their characteristics. A proper selection of protection devices (low-voltage fuses and circuit breakers) and their proper allocation according to distribution protection levels achieves protection selectivity. This paper presents the basic types of protection devices and their possible uses in DC power distribution sub-systems and the manner of achieving protection selectivity.

Ključne riječi: elektroenergetsko postrojenje; niskonaponski prekidač; niskonaponski rastalni osigurač; podsustav istosmjernog razvoda i napajanja; selektivnost zaštitnih uređaja

Key words: DC power distribution sub-system; electrical power facility; low-voltage circuit breaker; low-voltage fuses; protection device selectivity



1 UVOD

Vitalni dijelovi i komponente elektroenergetskih postrojenja koji trebaju funkcionirati u normalnom pogonu te u slučaju kvara ili poremećaja pogona elektroenergetskog sustava trebaju imati kontinuirano i pouzdano napajanje električnom energijom u svim pogonskim režimima, a to omogućuje pod-sustav istosmjernog razvoda i napajanja.

Zbog postizanja dovoljne raspoloživosti sustava istosmjernih napajanja nije prihvatljivo da svi zaštitni uređaji kroz koje se zatvara struja kratkog spoja u isto vrijeme prekinu struju kratkog spoja. Zaštitni uređaji koji se nalaze najbliže mjestu kvara trebali bi prekinuti prvi, a zaštitni uređaji svih prethodnih razina trebaju ostati uključeni. Na taj način se postiže brza izolacija mjesta kvara i omogućuje da sva ostala instalacija koja se napaja preko niskonaponskih prekidača prethodnih razina razvoda ostane uključena te da vitalne funkcije postrojenja ostanu sačuvane.

Odabirom pravilne vrste i rasporeda zaštitnih uređaja po zaštitnim razinama razvoda postiže se selektivnost zaštite.

Selectivnost između dva zaštitna uređaja može biti potpuna (područje od struja malih preopterećenja pa do struje koja odgovara graničnoj prekidnoj moći prekidača) i djelomična (područje od struja malih preopterećenja do granične vrijednosti prekidne struje kratkog spoja).

U podsustavima istosmjernog razvoda i napajanja elektroenergetskih postrojenja kao zaštitni uređaji najčešće se koriste niskonaponski rastalni osigurači i niskonaponski prekidači.

2 ELEKTRIČNI ZAŠTITNI UREĐAJI U ISTOSMJERNIM RAZVODIMA

2.1 Niskonaponski rastalni osigurači

Niskonaponski rastalni osigurači (u daljem tekstu NN osigurači) električki su zaštitni uređaji koji prekidaju strujni krug taljenjem svojih rastalnih elemenata u slučaju kada kroz njih prolazi kvadrat struje tereta u dovoljno dugom vremenskom intervalu (Joulov integral $\int i^2 dt$) (slika 1).

Rastalni elementi najčešće su bakar, ili srebro. Osigurači malih nazivnih struja imaju često samo jedan rastalni element, a oni većih nazivnih struja mogu imati i više od sto rastalnih paralelno spojenih elemenata unutar jednog osigurača. Radi nadziranja mjesta na kojemu se prekida kratki spoj,

1 INTRODUCTION

The vital parts and components of the electrical power facility that should function during normal operation and in the event of a fault or anomaly in the operation of the electrical power system should have a continual and reliable power supply in all operational modes. This is enabled by the DC power distribution sub-system.

Due to gaining adequate availability of the DC power supply system, it is unacceptable that all protection devices, through which the short circuit current closes, terminate the short circuit current at the same time. The protection devices that are found closest to the fault location should be terminated first, while the protection devices at all previous levels should remain connected. In this manner, a rapid isolation of the fault location is achieved allowing the remaining installation powered through the low-voltage circuit breaker at the previous distribution levels to remain connected and vital functions of the facility to remain intact.

In choosing the correct type and positioning of protection devices at the distribution protection levels, protection selectivity is achieved.

Selectivity between two protection devices can be complete (from small current overloads to currents that meet the maximum terminating ability of the circuit breaker) and partial (small current overloads to the maximum values for termination of the short circuit current).

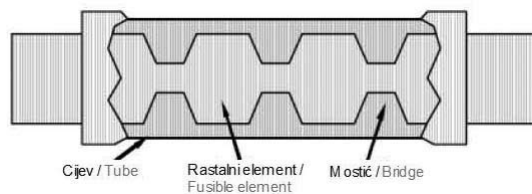
In direct current distribution and power supply for electrical power facilities, protection devices most often use low-voltage fuses and low-voltage circuit breakers.

2 ELECTRICAL PROTECTION DEVICES IN DIRECT CURRENT DISTRIBUTION SYSTEMS

2.1 Low-voltage Fuses

Low-voltage fuses (hereinafter: LV fuses) are electrical protection devices that terminate a short circuit by melting its fusible elements when a load current square passes through them for an adequately long time interval (Joul's integral $\int i^2 dt$) (Figure 1).

The fusible elements are most often copper or silver. Fuses with small rated currents often have only one melting component, while the larger rated current types may have more than a hundred melting elements connected in parallel within a single fuse. In order to supervise the location where the short circuit is to be terminated, each fusi-



Slika 1 — Poprečni presjek NN osigurača
Figure 1 — Perpendicular cross-section of the LV fuse

svaki rastalni element ima nekoliko mostića – mjesta suženja vodljivog puta. Budući da mostići imaju veći otpor od ostalog dijela rastalnog elementa, oko njih se stvara i viša temperatura nego oko ostalih dijelova.

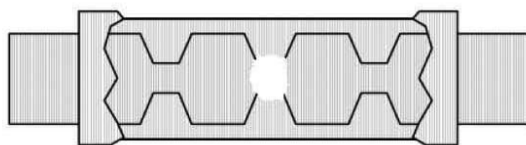
U vremenu dok je struja koja prolazi kroz osigurač niža od njegove nazivne struje osigurač se ponaša kao vodič i na njemu se zbog unutrašnjeg otpora osigurača stvara mali pad napona (nekoliko mV). Kada, zbog preopterećenja ili kratkog spoja, dođe do pregaranja jednog ili više mostića, kroz njih se zatvori električni luk (slika 2). Pad napona na osiguraču je tada približno jednak zbroju napona električnih lukova koji se stvaraju na mostićima. Nakon što osigurač prekine struju na njemu se pojavi nazivni napon podsustava istosmjernog razvoda i napajanja.

Broj mostića spojenih u seriju unutar jednog rastalnog elementa obično se odabire tako da pad napona tijekom prekidanja struje kratkog spoja na jednom mostiću ne bude veći od 150 V kod osigurača namijenjenih za primjenu pri izmjeničnom napajanju, te od 100 V kod osigurača za istosmjerna napajanja [1].

ble element has a number of bridges – places with a narrower conduction path. Since the bridges have a greater resistance than other parts of the fusible element, higher temperatures are created around the bridges than in other parts.

During the time a current passes through the fuse which is lower than the rated current value, the fuse behaves as a conductor and it experiences, due to the internal resistance of the fuse, a small reduction in voltage (a few mV). When, due to overloading or a short circuit, there occurs a burn-out of one of more of the small bridges, an electric arc closes over them (Figure 2). A voltage reduction at the fuse is then approximately equal to the sum of voltages of the electric arcs created at the bridges. Once the fuse terminates the current, a rated voltage occurs at the fuse of the DC power distribution system.

The number of bridges connected in series within a single fusible element is ordinarily chosen so that a fall in voltage during termination of short circuit current on one bridge will not be greater than 150 V for fuses intended for use during AC powering, and 100 V for fuses used in DC powering [1].



Slika 2 — Pregaranje NN osigurača zbog malog preopterećenja
Figure 2 — Burning a LV fuse due to a small overload

Pri prekidanju struje malog preopterećenja često se dogodi da pregori samo jedan mostić. Na njemu se tada razvije električni luk koji povećava pad napona na osiguraču i smanji struju preopterećenja. Kada kroz osigurač prolazi izmjenična struja, ona u intervalima od jedne poluperiode (10 ms) prolazi kroz nulu pa se u tom trenutku ugasi i električni luk koji se stvorio na pregorjelom mostiću i osigurač prekine struju preopterećenja.

When interrupting the current at small overloads, it often occurs that only a single bridge burns out. An electrical arc occurs on the bridge which further decreases in voltage at the fuse and reduces the load current. When AC current passes through the fuse, it passes in intervals of a half-period (10 ms) zero state and at that moment it extinguishes, while the electric arc formed at the burnt-out bridge and the fuse terminates the current load.

Kada, međutim, kroz osigurač prolazi istosmjerna struja, ona, za razliku od izmjenične struje, ne mijenja periodički iznos i ne prolazi kroz nulu pa je električni luk potrebno ugasiiti za vrijeme dok kroz njega prolazi struja vrijednosti različite od nule. Energija električnog luka je proporcionalna naponu luka, induktivitetu strujnog kruga i kvadratu trenutačne vrijednosti struje $E_a \approx U_a \cdot L \cdot I^2$. Što je energija električnog luka veća, to će sposobnost osigurača da prekine istosmjernu struju biti manja. Stoga je potrebno uvesti pojam vremenske konstante istosmjernog kruga $T = L / R$, ms, koja karakterizira brzinu porasta istosmjerne struje.

Povećanjem induktiviteta L , H proporcionalno raste i vremenska konstanta istosmjernog kruga T kao i energija električnog luka E_a , W. Na temelju navedenoga može se zaključiti da će se u tom slučaju smanjiti i sposobnost osigurača da prekine istosmjernu struju, odnosno da je sposobnost prekidanja istosmjerne struje obrnuto proporcionalna veličini vremenske konstante istosmjernog kruga T .

Kod istosmjerne struje može se također pretpostaviti da napon izvora ima približno konstantnu vrijednost te da će prekidanje istosmjerne struje kratkog spoja približno započeti tek nakon što napon električnog luka U_a poraste do vrijednosti više od napona izvora. Zbog toga dolazi do povećanja dužine električnog luka na pregorjelom mostiću, što dodatno povećava pad napona i snižava struju, tako da ostali mostići ne mogu pregorjeti. Ako se taj električni luk ne uspije dovoljno brzo ugasiiti, doći će do eksplozije osigurača.

Važno je također naglasiti da su malo preopterećenje i velika vremenska konstanta istosmjernog kruga vrlo kritični za osigurače koji se primjenjuju u istosmjernim razvodima, posebno ako se za tu namjenu koriste osigurači za izmjeničnu struju.

Prekidanje velikih struja kratkog spoja kod NN osigurača nije kritično kao prekidanje malih struja kratkog spoja, budući da je u tom slučaju zagrijavanje rastalnog elementa tako brzo da više mostića pregori u istom trenutku stvarajući pritom više serijskih električnih lukova koji dijele ukupni pad napona na osiguraču. Kada je pad napona na osiguraču jednak ili veći od nazivnog napona podsustava istosmjernog razvoda i napajanja, dolazi do gašenja električnih lukova i pregaranja osigurača.

Pri velikim strujama kratkog spoja pregaranje NN osigurača najčešće se dogodi prije nego što struja kratkog spoja dostigne maksimalan iznos, pa se smatra da osigurači ograničavaju struju kratkog spoja.

When, however, the DC current passes through the fuse, contrary to the AC current, it does not change the periodic value and does not pass the zero state, hence the electric arc should be extinguished when the current with values not equal to zero passes through it. The energy of an electric arc is proportional to the voltage arc, to the inductivity of the circuit and to the square of the momentary current value $E_a \approx U_a \cdot L \cdot I^2$. The greater the energy of the electric arc, the smaller the ability of the fuse to interrupt the AC current. Therefore, it is necessary to introduce the concept of time constants for AC circuits $T = L / R$, ms, characterising the rate of increasing the AC current.

By increasing inductivity L , H , the time constant T for the DC circuit increases proportionally as does the power of the electrical arc E_a , W. Based on what has been mentioned, it can be concluded that in this case the ability of the fuse to interrupt the DC current will be reduced, and that the ability to interrupt the DC current is inversely proportional to the size of the DC circuit time constant T .

For the DC current, it can also be assumed that the source voltage has approximately the same constant value and that interrupting the short circuit DC current will begin only approximately after the voltage of the electric arc U_a increases to a value greater than the source voltage. Consequently, there occurs an increase in the length of the electric arc on the burned bridge, further increasing the fall in voltage and reducing the current, so that the other bridges cannot melt. If this electric arc is not extinguished quickly enough, the fuse will explode.

It is also important to emphasise that a small load and a large time constant for the DC circuit are very critical for fuses that are used in DC distribution systems, especially if an AC fuse is used for this purpose.

Interruption of large short circuit currents for low-voltage fuses is not as critical as when interrupting small short circuit currents, since in this case heating of the disintegrating element is so rapid that a number of bridges will burn out at the same time creating subsequently a multiple series of electric arcs that share the total voltage reduction in the fuse. When the voltage reduction in the fuse is the equal or greater than the rated voltage of the DC power distribution sub-system, the electrical arc is extinguished and the fuse burns out.

For large short circuit currents, burning out of the low-voltage fuse most often occurs before the short circuit current reaches the maximum value, hence we say the fuse limits the short circuit current.

Besides unreliability when interrupting small overloads and large inductive loads, low-voltage fuses

Pored nepouzdanosti kod prekidanja malih preopterećenja i velikih induktivnih tereta, NN osigurači imaju i druge nedostatke:

- točka prekidanja se mijenja u ovisnosti o temperaturi okoline, a tolerancija isklopa može biti i preko 50 %,
- potrebno je zamijeniti rastalni element nakon svakog pregaranja,
- daljinska signalizacija pregaranja osigurača je znatno složenija i nepouzdanija nego kod prekidača te se često i ne ugrađuje,
- prekidna moć osigurača za domaćinstvo (tip D i DO) je samo 8 kA pri 250 V, što nije dovoljno za većinu istosmjernih razvoda u velikim elektroenergetskim postrojenjima,
- prilikom povremenih preopterećenja postoji mogućnost da osigurač ne prekine struju, ali da mu rastalni element djelomično izgori te da, nakon što bude ponovo opterećen, potpuno pregori i tada pri manjoj struji od očekivane izazove neselektivan isklup u razvodu,
- u pogonskim uvjetima čest je slučaj da se nakon pregaranja rastalni elementi osigurača zamijene neodgovarajućim, što također može izazvati neselektivan isklup i gubitak pouzdanosti istosmjernog razvoda, a projektantski to nije moguće spriječiti.

Navedeni nedostaci glavni su razlozi zbog kojih se u modernim podsustavima istosmjernog razvoda i napajanja u elektroenergetskim postrojenjima NN osigurači, kao električni zaštitni uređaji, rijetko koriste.

Zbog specifičnosti istosmjernih strujnih krugova danas se za primjenu u istosmjernim razvodima proizvode i specijalni osigurači punjeni materijalima za brzo gašenje električnog luka i rastalnim elementima s povećanim brojem serijski spojenih mostića. Međutim, njihova primjena je ipak najčešća u električnim transportnim postrojenjima, gdje su nazivni istosmjerni naponi vrijednosti i do 1 200 V.

2.2 Niskonaponski prekidači

Niskonaponski prekidači električki su zaštitni uređaji koji u normalnim pogonskim prilikama uklapaju, vode i isklapaju električnu struju, a mogu i pouzdano uklopiti i (ili) prekinuti strujni krug pri preopterećenju i kratkom spoju [2].

Niskonaponski prekidači (NN prekidači) mogu se razvrstati prema različitim kriterijima. Tako ih se prema načinu mehaničke izvedbe može podijeliti na zračne, kompaktne i male prekidače. Osim toga postoje podjele i prema ugrađenim isklupnim jedinicama, načinu ugradnje u ormare razvoda, načinu gašenja električnog luka, i dr.

have other inadequacies:

- the interruption point changes depending on the temperature of the surroundings, while the de-energization tolerance can be over 50 %,
- it is necessary to replace the fusible element following each burn-out,
- remote signalisation of a burnt-out fuse is significantly more complex and less reliable than at a circuit breaker and is often not installed,
- the fuse interruption capacity for households (type D or DO) is only 8 kA at 250 V, which is inadequate for most DC distribution systems in large electrical power facilities,
- during temporary overloading, there exists the possibility that the fuse will not interrupt the current, and that its fusible elements only partially burn out, and that after it is loaded again, it will completely burn out and then for currents smaller than expected events a non-selective de-energization in the distribution system,
- in operational conditions, often the case is that once it has burned out, the fusible element is replaced by an inappropriate fuse, which can also lead to non-selective de-energization and loss of reliability in the DC distribution system, while in terms of design, this cannot be avoided.

The stated inadequacies are the main reasons due to which, in modern DC power distribution sub-systems located in electrical power facilities, the low-voltage fuses acting as electrical protection devices are rarely used!

Due to the specifics of the DC circuit, today, special fuses, filled with materials for quick extinguishing of the electric arc, are used in DC distribution products, as well as fusible elements with an increased number of serially connected bridges. However, their use occurs most frequently in electrical transport facilities, where the rated DC voltages are up to 1 200 V.

2.2 Low-Voltage Circuit Breakers

Low-voltage circuit breakers are electrical protection devices which, in normal operating conditions, activate, manage and interrupt the electrical current, and are able to reliably activate and (or) interrupt the circuit during loads and short circuits .

Low-voltage circuit breakers (LV circuit breakers) can be categorised according to various criteria. Hence, they can be, based on their mechanical construction, divided into air, moulded case and miniature circuit breakers. Also, there exist divisions according to installed trip units, the manner of installation into distribution cabinets, and the manner of extinguishing the electrical arc, and so on.



Slika 3 — Zračni NN prekidač namijenjen za prekidanje istosmjerne struje
Figure 3 — Low-voltage DC air circuit breaker

Zračni prekidači (slika 3) su NN prekidači koji se proizvode za velike nazivne struje, od 800 A do 6 300 A. Kako bi izdržali snažne mehaničke sile i veliko zagrijavanje koje se javlja pri prekidanju velikih struja kvara izvedeni su mehanički vrlo robusno. Za razliku od manjih, malih i kompaktnih prekidača, pogodni su za održavanje, budući da se sklapaju od više sastavnih dijelova koje je tijekom održavanja radi neispravnosti moguće jednostavno zamijeniti. Osim skraćenice ACB (naziv prema IEC-u) za ovu vrstu NN prekidača upotrebljavaju se i skraćenice ICCB (engl. *Insulated Case Circuit Breaker*) i PCB (engl. *Power Circuit Breaker*).

Air circuit breakers (Figure 3) are low-voltage circuit breakers that are manufactured for large rated currents, ranging from 800 A to 6 300 A. In order to withstand the strong mechanical forces and extensive heating occurring during interruption of large fault currents, they are mechanically constructed very robust. In comparison to the smaller circuit breakers, the smaller and module case circuit breakers, they are suitable for maintenance since they are comprised of multiple integral parts that may be simply replaced during maintenance due to faults. Besides the abbreviations ACB (designation according to IEC) for this type of LV circuit breaker, the abbreviations ICCB (Insulated Case Circuit Breaker) and PCB (Power Circuit Breaker) are also used.

2.2.2 Kompaktni prekidači ili MCCB (engl. *Moulded Case Circuit Breakers*)

2.2.2 Moulded Case Circuit Breakers (MCCB)



Slika 4 — Kompaktni NN prekidač
Figure 4 — LV Moulded case circuit breaker

Kompaktni prekidači (slika 4) su NN prekidači smješteni u kompaktna kućišta od izolacijskog materijala, nisu poput zračnih prekidača pogodni za održavanje i popravljanje te je u slučaju neispravnosti bilo kojeg dijela potrebno zamijeniti cijeli prekidač. Kućište onemogućuje neposredan dodir dijelova pod naponom. Kompaktni prekidači imaju uklopnu ručicu s tri položaja (uklopljeno – isključeno zbog prorade zaštite – isključeno), a proizvode se za nazivne struje od 16 A do 3 200 A.

The moulded case circuit breakers (Figure 4) are low-voltage circuit breakers located in a compact housing made of insulation materials; they are not completely like air circuit breakers, are not suitable for maintenance and repairs and in the event of a fault in any part, it is necessary to replace the whole circuit breaker. The housing does not permit direct contact with the parts under voltage. The moulded case circuit breakers have a switching handle with three positions (switched – switched off due to activation of protection – and deactivated/switched off).

2.2.3 Mali niskonaponski prekidači ili MCB (engl. *Miniature Circuit Breakers*)

They are manufactured for rated currents ranging from 16 A to 3 200 A.

2.2.3 Miniature Circuit Breakers (MCB)



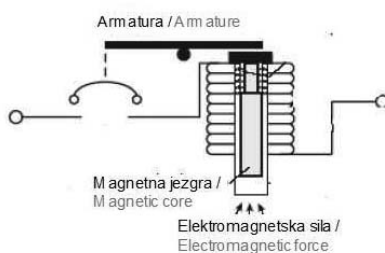
Slika 5 — Mali istosmjerni nn prekidač
Figure 5 — LV DC miniature circuit breaker

Mali niskonaponski prekidači (slika 5) su prekidači malih dimenzija, za montažu na DIN-nosač, s TM-okidačima ugrađenim fiksno u prekidaču (okidači nisu odvojivi od malih prekidača kao što je najčešći slučaj kod ACB i MCCB). Mali prekidači se proizvode za struje od 0,5 A do 100 A, u potpunosti su bez održavanja i mogućnosti popravka.

2.2.4 Podjela niskonaponskih prekidača prema ugrađenim isklonim jedinicama
Niskonaponske prekidače prema ugrađenim isklonim jedinicama može se podijeliti na hidro-magnetske, termo-magnetske, magnetske (bez termičke zaštite) ili trenutačne i prekidače s mikroprocesorskim okidačima.

Miniature low-voltage circuit breakers (Figure 5) are small-dimensioned circuit breakers used for installing on DIN-carriers, with TM-trip units installed in a fixed manner in the circuit breaker (trip units are not separable from small circuit breakers as is most often the case with ACBs and MCCBs). Miniature circuit breakers are devices for currents ranging from 0,5 A to 100 A, with no possibility of maintainance or repair.

2.2.4 Categories of Low-Voltage Circuit breakers based on Installed trip units
Low-voltage circuit breakers based on installed trip units may be divided into hydromagnetic, thermo-magnetic, magnetic (with no thermal protection) or momentary and those with microprocessor trips.



Slika 6 — Presjek hidro-magnetskog okidača
Figure 6 — Cross section of a hydromagnetic trip unit

Prekidači s hidro-magnetskim okidačima (slika 6) se koriste kao posebna izvedba malih NN prekidača. Kod ovog tipa prekidača magnetska se sila, koja se javlja zbog protjecanja struje kvara, ne koristi samo za isklapanje struje kratkog spoja već i za isklapanje pri preopterećenju. Prilikom preopterećenja vrijeme prorade se regulira korištenjem tekućine koja se nalazi unutar cijevi zajedno s magnetskom jezgrom. Brzinu pomicanja magnetske

Circuit breakers with hydromagnetic trip units (Figure 6) are used as special versions of miniature LV circuit breakers. For this type of circuit breaker, the magnetic force, appearing due to the release of a fault current, is not used just for interrupting short circuit current but also for interruption during overloads. During overloads, the activation time is regulated by the use of fluid found within the tube together with the magnetic core. The

jezgre unutar cijevi određuje viskozitet tekućine. Promjenom viskoziteta tekućine postižu se različite vremenske karakteristike prekidanja pri preopterećenju, prilagođene vrsti trošila koja se napajaju preko određenog NN prekidača. Kada nastupi kratki spoj (približno $6 \cdot I_n$), prorada okidača je neovisna o viskozitetu tekućine, budući da okidač trenutačno privuče armaturu i izvrši isklon prekidača. Hidro-magnetski prekidači ne omogućavaju postizanje selektivnosti u više od dvije razine razvoda i namijenjeni su za prekidanje struja u podsustavima niskih istosmjernih napona te se najčešće koriste u podsustavima istosmjernog razvoda i napajanja za telekomunikacije (nazivni istosmjerni naponi do 60 V).

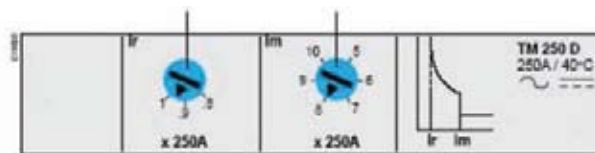
speed of movement of the magnetic core within the tube is determined by the viscosity of the fluid. With changes to the viscosity of the liquid, various time characteristics of interruption during overloading are achieved, adapted to types of loads that are supplied with power through a certain LV circuit breaker. When a short circuit occurs (approximately $6 \cdot I_n$), activation of the trip unit is independent of the liquid viscosity, since the trip unit momentarily pulls the contact and completes the circuit breaker switch. Hydromagnetic circuit breakers do not allow selectivity at more than two distribution levels and are intended for interrupting the current in low DC voltage sub-systems and most often used in the DC power distribution system for telecommunications (rated DC voltage up to 60 V).



Slika 7 — Mikroprocesorski okidač
Figure 7 — Microprocessor trip unit

S obzirom na činjenicu da imaju velike mogućnosti podešavanja zaštite, upravljanja i prijenosa podataka, danas se vrlo često primjenjuju NN zračni i kompaktni prekidači opremljeni mikroprocesorskim (elektroničkim) okidačima (slika 7). Međutim, mikroprocesorski okidači za nadzor struje najčešće koriste strujne transformatore. Budući da strujni transformatori nisu primjenjivi u istosmjernim razvodima, mikroprocesorski okidači do sada najčešće nisu bili namijenjeni za upotrebu u istosmjernim strujnim krugovima. Tek odnedavno su se na tržištu pojavili prvi prekidači s mikroprocesorskim okidačima namijenjeni za upotrebu u istosmjernim razvodima (slika 3).

Considering the fact that they have great possibilities to configure the protection, management and data transfer, today LV air and moulded case circuit breakers are very often equipped with microprocessor (electronic) trip units (Figure 7). However, the microprocessor trip unit for monitoring the current is mostly used by current transformers. Since current transformers are not applicable in DC distribution systems, microprocessor trip units up until now were most often not intended for use in DC circuits. Only recently have the first circuit breakers with microprocessor trip units intended for use in DC circuits appeared on the market (Figure 3).



Slika 8 — Termo-magnetski okidač
Figure 8 — Thermomagnetic trip unit

U istosmjernim razvodima se najčešće koriste NN kompaktni i mali prekidači s termo-magnetskim (TM) okidačima (slike 8 i 9) čija je tipična krivulja prekidanja struje predočena na slici 10. Danas proizvođači prekidača s TM okidačima najčešće

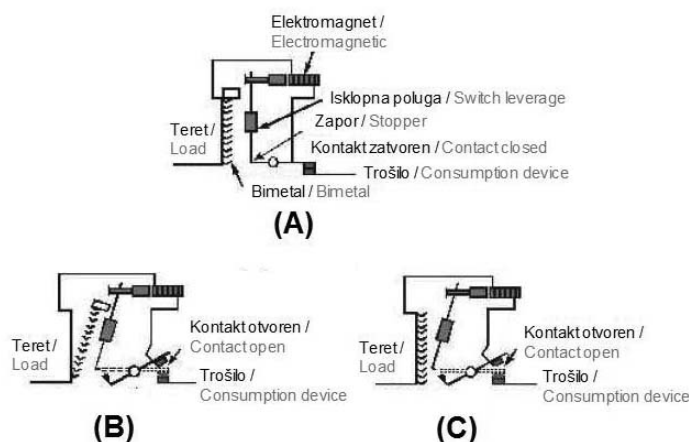
In DC distribution systems, most often the LV moulded case and miniature circuit breakers with thermomagnetic (M) trip units are used (Figure 8 and 9), the typical current termination curve of which is shown in Figure 10. Today, manufactu-

u katalogima prilažu krivulje prekidanja za izmjeničnu struju, a za ugradnju u istosmjernu strujne krugove definiraju faktore pomaka krivulje u odnosu na izmjeničnu struju.

Zbog toga je potrebno usporediti ponašanje prekidača s TM okidačima pri prekidanju izmjenične i istosmjernu struje (slika 9).

ers of the circuit breaker with TM trip units most often show in catalogues the termination curve for the AC current, whereas a curve displacement factor is defined with respect to the AC current for installation into DC circuits.

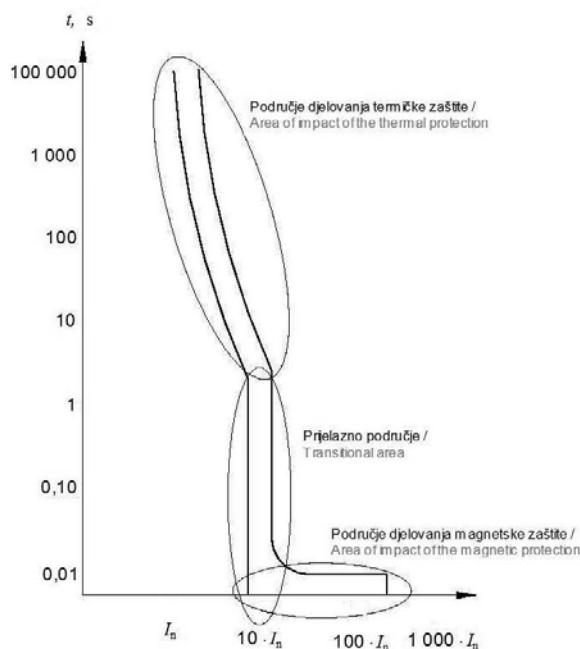
Consequently, it becomes necessary to compare the behaviour of circuit breakers with TM trip units when terminating AC and DC currents (Figure 9).



Slika 9 — Princip okidanja termo-magnetskih okidača
Figure 9 — The triggering principle in thermomagnetic trip unit

Iz slike 10 je vidljivo da se isklonka karakteristika prekidača s TM okidačima može podijeliti u tri dijela. Područje djelovanja termičke zaštite počinje od nazivne struje prekidača (I_n) do struja vrijednosti približno $3 \cdot I_n$ do $12 \cdot I_n$. U tom dijelu karakteristike na isklonku prekidača djeluje bimetal smješten u termičkom okidaču (slika 9B). Dok struja prolazi kroz bimetal on se grije i rasteže. Kada se bimetal dovoljno zagrije, mehanički će djelovati na isklonku polugu, koja će zatim izvršiti otvaranje kontakata i isklonku prekidača. Prorada termičkog okidača proporcionalna je s integralom kvadrata struje ($I^2 \cdot t$), tj. s kvadratom struje i trajanjem vremena kvara. Budući da je nazivna vrijednost izmjenične struje definirana kao struja koja na otporniku stvara isto zagrijavanje kao odgovarajuća istosmjerna struja, isklonka karakteristika u području prorade termičke zaštite identična je za izmjeničnu (nazivna vrijednost struje) i istosmjernu struju [3].

In Figure 10 it is evident that the de-energization characteristic of the circuit breaker with the TM trip unit can be divided into three parts. The area of activity by the thermal protection begins from the circuit breaker rated current (I_n) to the current value being approximately $3 \cdot I_n$ to $12 \cdot I_n$. In this part of the characteristics, the bimetal situated in the thermal trip unit (Figure 9b) impacts the circuit breaker de-energization. While the current passes through the bimetal, it heats up and expands. When the bimetal heats up enough, it mechanically impacts the switch leverage, which will thereafter open the contact and de-energize the circuit breaker. Activation of the thermal trip unit is proportional to the integral of the current squared ($I^2 \cdot t$), i.e. with the current squared and the length period of the fault. Since the rated value of the AC current is defined as the current which creates the same heat at the resistor as the respective DC current, the de-energization characteristic in the area of thermal protection activation is identical to the AC (rated current value) and DC current.



Slika 10 — Tipična krivulja prekidanja TM prekidača
Figure 10 — Typical TM circuit breaker termination curve

U dijelu krivulje gdje završava djelovanje termičke zaštite i počinje djelovanje magnetske zaštite nalazi se prijelazno područje. Vrijeme isklopa u tom području nije moguće točno odrediti budući da je tolerancija prorade magnetskog okidača $\pm 20\%$ oko srednje vrijednosti struje prorade. Magnetska sila koja nastaje kada kroz zavojnicu prolazi struja izaziva proradu magnetske zaštite (slika 9C). Magnetska sila je proporcionalna kvadratu trenutačne vrijednosti struje. Budući da je maksimalna vrijednost izmjenične struje sinusnog oblika za 1,41 puta veća od njezine nazivne vrijednosti, a maksimalna vrijednost istosmjerne struje identična nazivnoj vrijednosti, kod primjene prekidača s TM okidačima pri prekidanju istosmjerne struje dolazi do pomaka struje prorade magnetske zaštite, odnosno do produljenja područja djelovanja termičke zaštite. Taj pomak kod malih prekidača iznosi otprilike $1,4 \cdot I_m$ (najviša vrijednost sinusne funkcije, pri čemu je I_m nazivna izmjenična struja kod koje dolazi do prorade magnetske zaštite). Za razliku od malih prekidača, robusniji kompaktni i zračni prekidači, nakon što struja kvara stvori graničnu magnetsku silu isklapanja, ne mogu trenutačno izvršiti proradu magnetskog okidača. Zbog toga je kod njih pomak krivulje prorade magnetskog okidača manji i iznosi između $1,1 \cdot I_m$ do $1,4 \cdot I_m$.

U trećem dijelu krivulje predložene na slici 10 nalazi se područje djelovanja magnetske zaštite. U tom području struja ima dovoljno visoku vrijednost da sila koja djeluje na elek-

The curve section where activation of thermal protection ceases and magnetic protection begins is the transitional area. The de-energization period in this area cannot be exactly determined since the tolerance for activation of the magnetic trip unit is $\pm 20\%$ of the median activation current. The magnetic force occurring when current passes through the coil causes the activation of magnetic protection (Figure 9c). The magnetic force is proportional to the square of the momentary current value. Since the maximum value of the AC current for the sinusoidal shape is 1,41 times greater than its declared value, and the maximum AC current value is identical to the rated value, when using a circuit breaker with TM trip units during interruption of the DC current, there occurs a movement of the activation current in the magnetic protection, and a larger area of operation for thermal protection. This shift for small circuit breakers amounts to around $1,4 \cdot I_m$ (highest value of the sinusoidal function, whereby I_m is the rated AC current causing activation of magnetic protection). In comparison to small circuit breakers, in the more robust compact and air circuit breakers, once the fault current produces maximum termination magnetic force, these circuit breakers are not able to momentarily activate the magnetic trip unit. Consequently, the activation curve for the magnetic trip unit shifts less and amounts to between $1,1 \cdot I_m$ and $1,4 \cdot I_m$.

In the third section of the curve shown in Figure 10, there are operational areas for magnetic protection. In this area, the current has a suitably high value so

tromagnet isklopi prekidač u vrlo kratkom vremenu, nedovoljno dugom da se bimetal značajnije zagrije. Ukoliko vremenska konstanta istosmjernog kruga nije veća od **10 ms**, nema bitne razlike u vremenu prekidanja istosmjerne struje u odnosu na izmjeničnu struju u tom dijelu *I-t* krivulje.

Osim izmjeničnih prekidača s TM okidačima, koji se mogu koristiti i za prekidanje istosmjernih struja, danas se proizvode i prekidači s TM okidačima predviđeni isključivo za prekidanja istosmjernih struja. Kod njih su karakteristike prekidanja već definirane za istosmjerne struje i nije potrebno provoditi korekciju krivulja zbog pomicanja mjesta prorade magnetske zaštite.

Posebno su zanimljivi mali prekidači deklarirani samo za istosmjernu struju. Naime, svi mali prekidači ograničavaju struje kratkog spoja, pa su u stanju i prekinuti istosmjernu struju. Međutim, pri višim naponima za prekidanje istosmjernih struja potrebno je u seriju povezati veliki broj polova prekidača (oko **60 V/pol**). Zbog toga se izrađuju posebni prekidači za istosmjerne struje s dodatnim permanentnim magnetom koji je tako polariziran da pri kratkom spoju izaziva produljenje električnog luka, te na taj način pospješuje njegovo gašenje. Takvi prekidači su u stanju prekinuti istosmjernu struju s naponima **120 V/pol** do **250 V/pol**. Mali prekidači deklarirani za istosmjerne struje trebaju se kod ugradnje u istosmjerni razvod priključiti tako da kroz njih struja prolazi propisanim smjerom. U slučaju priključka na razvod na pogrešni smjer istosmjerne struje permanentni magnet prekidača će se pogrešno polarizirati i umjesto produljenja izazvat će skraćivanje električnog luka. Na taj način, umjesto pospješivanja prekidanja, dogodit će se sprječavanje prekidanja električnog luka i uništenje NN prekidača.

NN prekidači s magnetskim ili trenutačnim okidačima imaju magnetsku isklonnu jedinicu identičnu kao TM okidači, samo što ne sadrže bimetal. Ti prekidači štite krugove istosmjernog razvoda i napajanja samo od kratkog spoja te zaštitu od preopterećenja treba riješiti nekim drugim zaštitnim uređajem u strujnom krugu. Ovi prekidači se, također, ponekad koriste u istosmjernim razvodima.

2.2.5 Ostale podjele niskonaponskih prekidača

Osim do sada navedenih postoje i druge podjele niskonaponskih prekidača. Tako na primjer postoji podjela na izvlačive, utične (engl. *plug-in*) i fiksne prekidače, prema načinu njihove ugradnje u ormare razvoda. Također postoji i podjela na prekidače za zaštitu kabela, prekidače za zaštitu motora, prekidače za zaštitu transformatora, prekidače za zaštitu kondenzatorskih

that the force acts on the electromagnetic de-energization of the circuit breaker in a very short interval, not long enough for the bimetal to significantly heat up. Inasmuch as the time constant for the DC circuit is not greater than **10 ms**, there are no significant differences in the interruption time for the DC current with respect to the AC current in that *I-t* area of the curve.

Besides the AC circuit breakers with TM trip units, which can be used also for interrupting the DC current, today's circuit breakers with TM trip units are produced exclusively for interrupting the DC current. For these circuit breakers the interruption characteristics are already defined for the DC current and it is not necessary to carry out curve corrections due to the shift in activation points of magnetic protection.

Especially interesting are the miniature circuit breakers declared only for DC currents. Namely, all small circuit breakers limit short circuit currents, hence they are capable of interrupting the DC current. However, at higher voltages, interrupting the DC current requires linking in series a large number of circuit breaker poles (around **60 V/pol**). Therefore, a special circuit breaker is constructed for the DC current with an additional permanent magnet which is polarised so that during short circuits it causes an extension to the electric arc, and in this way improves its extinguishing. These circuit breakers are able to interrupt the DC current at voltages of **120 V/pol** to **250 V/pol**. Miniature circuit breakers declared for use with DC currents should, when installed into DC distribution systems, be connected so that current flows through them in the prescribed direction. In the event that the connection to the distribution is in the wrong DC current direction, the permanent magnet circuit breaker will be incorrectly polarized and instead of extending the electrical arc it will cause the electrical arc to be shortened. In this way, instead of improving interruption, what will happen is prevention of the electrical arc terminating and destruction of the LV circuit breaker.

LV circuit breakers with magnetic or instantaneous trip units possess a magnetic trip unit identical to the TM trip unit, only without bimetal. These circuit breakers protect circuits in DC power distribution systems only against short circuiting and protection against overloading should be resolved by other protection devices in the circuit. These breakers are also sometimes used in DC distribution systems.

2.2.5 Other Divisions of Low-Voltage Circuit Breakers

Besides the above stated there exist other categories of low-voltage circuit breakers. Hence for example, there is the division on withdrawable, plug-in and fixed circuit breakers, according to the manner of their installation in the distribution cabinet. Also, there are categories of circuit breakers for cable pro-

baterija, prekidače za ugradnju u brodovima te podjela na prekidače za zaštitu poluvodiča, prema namjeni za koju su proizvedeni.

Zanimljiva je također i podjela na NN prekidače koji velike struje kratkog spoja prekidaju pri prolazu struje kroz nulu i prekidače koji ograničavaju struju kratkog spoja [4]. Karakteristika je NN prekidača koji struje kratkog spoja prekidaju pri prolazu struje kroz nulu da pri kratkom spoju gašenje električnog luka nastupi nakon što NN prekidač propusti vršnu vrijednost struje kratkog spoja. U izmjeničnim mrežama se za prekidanje struje koristi trenutak prolaska struje sinusnog oblika kroz nulu, pa se za njih koristi i engleski naziv (engl. *current-zero cut off breaker*). Nedostaci ovih prekidača su sljedeći:

- niska prekidna moć, što je posebice izraženo pri prekidanju istosmjerne struje zbog znatno složenijeg principa gašenja luka (izuzetak su zračni NN prekidači robusne mehaničke izvedbe),
- otežano postizanje selektivnosti s nekoliko prekidača klasične izvedbe u seriji.

Danas se još kao *current-zero cut off breaker* proizvode najčešće zračni NN prekidači koji spadaju u tzv. kategoriju B prekidača. Takvi prekidači mogu osigurati vremensku selektivnost pri velikim strujama kratkog spoja, jer mogu određeno vrijeme (podesivo do nekoliko stotina milisekundi) voditi struju kratkog spoja, te je potpuno prekinuti tek nakon isteka toga vremena.

Moderni kompaktni i mali prekidači ograničavaju struju kratkog spoja, tj. prekidaju struju kratkog spoja prije nego što ona postigne vršnu vrijednost. Ograničavanjem struje skraćuje se i trajanje kratkog spoja, te kratki spoj traje kraće nego u slučaju primjene prekidača kod kojih ne postoji ograničavanje.

Prednosti ograničavanja struja kratkog spoja:

- znatno manje dimenzije prekidača i veća prekidna moć,
- sličan princip prekidanja struja kratkog spoja za istosmjernu i izmjeničnu struju,
- smanjenje elektromagnetskih i termičkih utjecaja koji se javljaju prilikom kratkog spoja na opremi koju štite, te opremi koja se nalazi u njihovoj neposrednoj blizini,
- smanjenje mehaničkih sila koje se javljaju pri kratkom spoju na štitičnim uređajima.

Navedene prednosti imale su za posljedicu činjenicu da se u najnovijim podsustavima istosmjernih razvoda i napajanja uglavnom koristi ova vrsta niskonaponskih prekidača.

tection, motor protection, transformer protection, protection of shunt capacitors, circuit breakers for installing in boats and categories of circuit breakers for semiconductor protection, based on the uses for which they are manufactured.

What is also interesting is the category of LV circuit breakers which interrupt large short circuit currents during the passing of currents through zero state and circuit breakers that limit short circuit current connections [4]. A characteristic of LV circuit breakers interrupting short circuit currents when current passes through zero is that during short circuits, extinguishing the electric arc occurs after the LV circuit breaker releases the peak value of the short circuit current. In AC grids, interruption of current is performed using the momentary passing of a sinusoidal current wave through zero, hence the English term is used *current-zero cut off circuit breaker*. The inadequacies of these circuit breakers are the following:

- low interrupting capacity, which is especially present during the interruption of the DC current due to the significantly more complex principle of extinguishing the arc (exceptions are the LV air circuit breakers incorporating a robust mechanical construction),
- difficulties in achieving selectivity with a number of circuit breakers classically constructed in a series.

Today, the most frequently manufactured LV air circuit breaker is the *current-zero cut off circuit breaker* which belongs to the so called B category of circuit breakers. These circuit breakers can ensure time selectivity during large short circuit currents, because, during a certain time, they can (configurable up to a few hundreds of a millisecond) manage short circuit currents, and completely interrupt currents only after the expiration of this time.

Modern compact and miniature circuit breakers limit short circuit current, i.e. interrupt short circuit current before it reaches the peak value. In limiting the current, the time period of the short circuit is reduced, and the short circuit lasts less than in the case of using a circuit breaker without limitation.

The advantages of limiting short circuit current are:

- significantly smaller size circuit breakers and greater interrupting capacity,
- similar principle for interrupting short circuit current for DC and AC currents,
- reduction of electromagnetic and thermal influences that appear during short circuits on equipment that is protected, and equipment that is located in their direct vicinity,
- reduction in mechanical forces that appear during short circuits on protected devices.

3 SELEKTIVNOST ISKLOPA ZAŠTITNIH UREĐAJA

3.1 Općenito

Analizu selektivnosti u istosmjernim razvodima otežava činjenica što isklompne karakteristike ($I-t$) zaštitnih uređaja, koje se obično definiraju za izmjenični napon i frekvenciju 50 Hz ne odgovaraju u potpunosti i za istosmjerne razvode. Štoviše, one se pri velikim strujama kratkog spoja međusobno bitno razlikuju, i trebaju se posebno preračunavati za svaku različitu vremensku konstantu ($T = L / R$) istosmjernog kruga [3], [5] i [6].

Postoji više različitih načina ostvarivanja selektivnosti između dvaju zaštitnih uređaja u niskonaponskim istosmjernim i izmjeničnim razvodima. Najčešće se koriste:

- vremenska selektivnost,
- blokiranje isklopa prethodne razine ili zonska selektivnost,
- strujna selektivnost,
- energetska selektivnost i selektivno ograničenje ili SELLIM i dr.

3.2 Vremenska selektivnost

Vremenska selektivnost se provjerava usporedbom $I-t$ krivulja prekidanja zaštitnih uređaja smještenih u raznim razinama zaštite [3].

Najčešće se koristi kod međusobne provjere potpune selektivnosti između glavnih prekidača (zračnih, kategorija B) kao i između tih prekidača i kompaktnih ili malih prekidača (prekidača kategorije A), te NN osigurača smještenih u istosmjernim razvodima. Prekidači kategorije A i NN osigurači prekidaju struje kratkog spoja u vremenu manjem od 10 ms, a vrijeme isklopa struja kratkog spoja glavnih prekidača je podjednako i može se postaviti na vrijednost i do nekoliko stotina milisekunda.

Uspoređuju se pripadajuće isklompne $I-t$ krivulje, koje su predložene na slici 10, a zaštitni uređaj sljedeće razine, uzimajući u obzir i propisima definirana moguća odstupanja krivulja, u cijelom opsegu struja od 0 do I_{ks} treba brže isklompiti od prekidača prethodne razine (slika 11).

The stated advantages result in the fact that these types of LV circuit breakers are used in the newest DC power distribution sub-systems.

3 DE-ENERGIZATION SELECTIVITY IN PROTECTION DEVICES

3.1 In General

Analysis of selectivity in DC distribution systems is hindered by the fact that de-energization characteristics ($I-t$) which are ordinarily defined for AC voltages at a frequency of 50 Hz are not fully suitable for DC distribution. Furthermore, for larger short circuit currents these greatly differ from one another, and should be specially calculated for each different DC circuit time constant ($T = L / R$) [3], [5] and [6].

There are various ways to achieve selectivity between two protection devices in LV DC and AC distribution systems. Those most frequently used are:

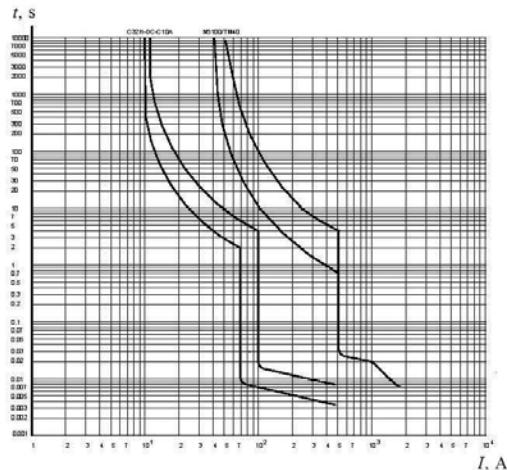
- time selectivity,
- blocking de-energization at the previous level or zone selectivity,
- current selectivity,
- power selectivity and selective limitation of SELLIM and so on.

3.2 Time Selectivity

Time selectivity is verified by comparing the $I-t$ curve for terminating a protection device located in various protection levels [3].

It is most frequently used for comparisons of full selectivity between the main circuit breaker (air, category B) and between these circuit breakers and compact or miniature circuit breakers (category A circuit breakers), and LV fuses located in DC distribution systems. Category A circuit breakers and LV fuses terminate short circuit currents in time periods of less than 10 ms, while the de-energization period for short circuit currents in main circuit breakers is configurable and can be set to values up to a few hundred milliseconds.

Respective de-energization $I-t$ curves are compared, shown in Figure 10, while the protection device for the next level, taking into account also possible deviations of the curves prescribed by regulations in the whole current range from 0 to I_{ks} , should be de-energized more quickly than the circuit breaker at the previous level (Figure 11).



Slika 11 — Isklopna I - t krivulja dvaju međusobno selektivnih prekidača
Figure 11 — Termination I - t curve of two mutually selective breakers

Ovaj način provjere koristi se i u kombinaciji s nekim drugim načinima provjere selektivnosti za NN prekidače kategorije A, tako da se vremenskom selektivnošću potvrđuje postojanje selektivnosti samo do struja koje predstavljaju malo preopterećenje za prekidače više razine, a za veće struje radi provjere selektivnosti koriste se druge metode.

3.3 Zonska selektivnost

Zonska selektivnost, ili blokiranje isklopa prethodne razine, ostvaruje se modernim NN prekidačima opremljenim mikroprocesorskim okidačima. Ovaj način postizanja selektivnosti razvijen je s ciljem da se ograniče termički gubici u kratkom spoju koji se događaju kada se u glavnom razvodu koriste prekidači s fiksno podešenim vremenskim kašnjenjem [7].

Okidači prekidača, čim prepoznaju struju kratkog spoja, šalju signal prekidačima smještenim na prethodnim razinama, te blokiraju proradu njihovih okidača. Vrijeme prekidanja glavnih prekidača, ako se kvar dogodi u području njihovog djelovanja, bit će značajno kraće nego ako se koristi vremenska selektivnost s ugrađenim fiksnim zatezanjem prekidanja prekidača pri velikim strujama kratkog spoja, kako je opisano u točki 3.2, te se na taj način ograničavaju termička naprezanja u kratkom spoju.

Korištenje zonske selektivnosti uglavnom je ograničeno na glavne izmjenične razvode opremljene velikim zračnim NN prekidačima s mikroprocesorskim okidačima i najčešće je neprimjenjivo za istosmjerne sustave, budući da su se tek nedavno na tržištu pojavili prvi zračni prekidači opremljeni mikroprocesorskim okidačima pogodnima i za korištenje u istosmjernim strujnim krugovima.

This verification method is also used in combination with other forms of selectivity verification for category A LV circuit breakers, so that time selectivity confirms the existence of selectivity only for currents that represent small loads for higher-level circuit breakers, while for larger currents in verifying selectivity other methods are used.

3.3 Zone Selectivity

Zone selectivity or blocking de-energization at the previous level, is achieved using modern LV circuit breakers equipped with microprocessor trip units. This manner of achieving selectivity was developed for the purpose of limiting thermal losses in short circuits which occur when circuit breakers with fixed time delay settings are used in the main distribution system.

Breaker trip units, having recognised a short circuit current, send a signal to the circuit breakers located at the previous level, and block the activation of the trip units. The interruption time of the main circuit breakers, if the fault occurs within their operational area, will be significantly shorter than if time selectivity with in-built fixed tension circuit breaker interruption is used during large short circuit currents, as described in point 3.2, and in this way thermal tension is limited in the short circuit.

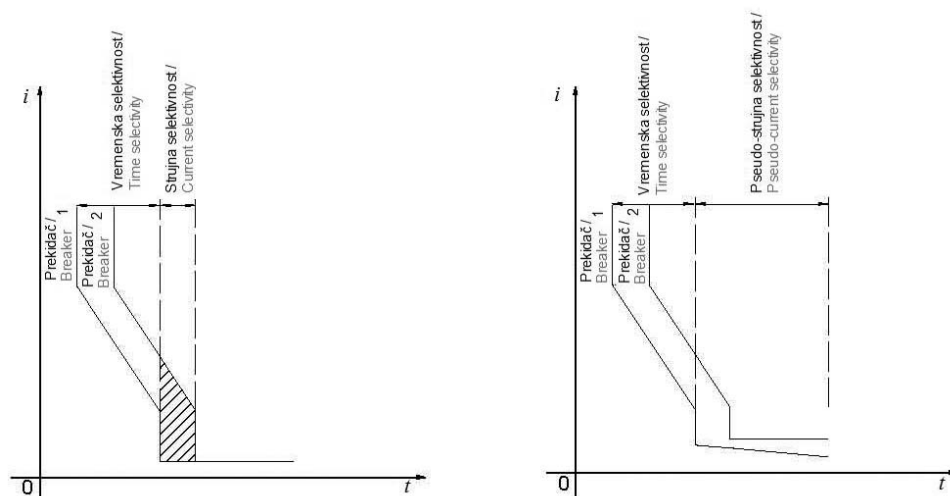
Use of zone selectivity is mainly limited to main AC distributions equipped with large LV air circuit breakers containing microprocessor trip units and is most often unusable for DC systems, since recently on the market the first air circuit breakers equipped with microprocessor trip units suitable for use in DC circuits have appeared.

3.4 Strujna selektivnost

Strujna selektivnost koristi se isključivo za provjeru selektivnosti između NN prekidača i to u području malih preopterećenja koje je ograničeno strujama prorade magnetskih okidača dvaju prekidača. Provjera se obavlja usporedbom $I-t$ krivulja prekidanja prikazanih na slici 12 [7], [8] i [9].

3.4 Current Selectivity

Current selectivity is used exclusively for verification of selectivity between LV circuit breakers and in the area of small overloads which is limited by activation currents in the magnetic trip units of two circuit breakers. Verification is performed by comparing the $I-t$ termination curve as shown in Figure 12 [7], [8] i [9].



Slika 12 — Strujna i pseudo (prividno)-strujna selektivnost
Figure 12 — Current and pseudo (apparent) – current selectivity

Kod NN prekidača koji ograničavaju struju kratkog spoja strujna selektivnost se može proširiti i do najviših struja kratkog spoja i u tom slučaju se naziva prividna ili pseudo-strujna selektivnost. Pri tome je potrebno odgovoriti na pitanje koliko treba prekidač ograničiti struju kratkog spoja i u kojem vremenu struju treba u potpunosti prekinuti da ne bi isključio prekidač prethodne razine, odnosno da bi se postigla prividna-strujna selektivnost?

Ukupno vrijeme prekidanja struje kratkog spoja NN prekidača sastoji se od:

- vremena trajanja naloga potrebnog za početak procesa prekidanja po isteku kojega se prekidanje više ne može zaustaviti,
- vremena potrebnog za okidanje magnetskog okidača, tj. za oslobađanje energije pohranjene u opružnom mehanizmu,
- vremena razvijanja električnog luka nakon otvaranja kontakata,
- vremena gašenja električnog luka.

Prividna-strujna selektivnost će postojati samo ako je ukupno vrijeme prekidanja prekidača određene razine manje od vremena trajanja naloga prekidača prethodne razine.

For LV circuit breakers that limit short circuit currents, current selectivity can be extended to the larger short circuit currents and in this instance is called pseudo-current selectivity. Additionally, it is necessary to answer the question as to the degree to which the circuit breaker should limit the short circuit current and in what period should it be completely terminated in order not to de-energize the circuit breaker at the previous level, that is, to achieve pseudo-current selectivity.

The total time to interrupt a short circuit connection in a LV circuit breaker comprises:

- necessary activation time period for initiating the interruption process upon expiration which interruption cannot be halted,
- time required for triggering the magnetic trip unit, i.e. for releasing the energy in the spring mechanism,
- time to create the electric arc after opening the contact,
- time to extinguish the electric arc.

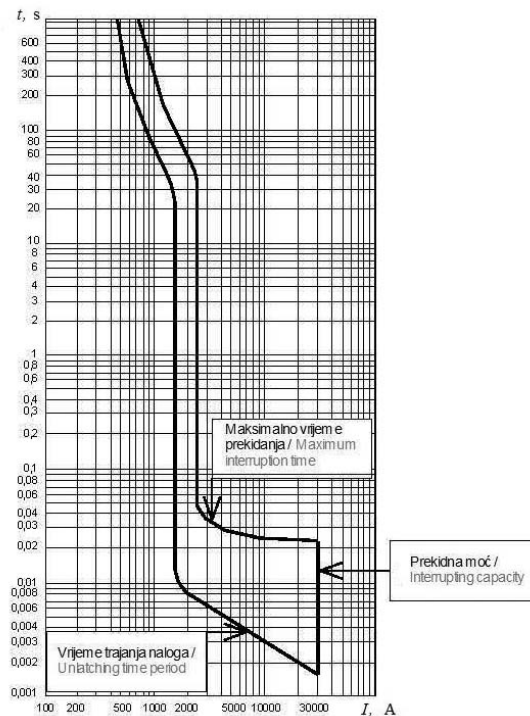
Pseudo-current selectivity will occur only if the total circuit breaker interruption period for a certain level is less than the time duration for initiating the circuit breaker at the previous level.

Potrebno vrijeme trajanja naloga (eng. *unlatching time, delatching time, pulse tripping ili command time*) ovisno je o struji kratkog spoja.

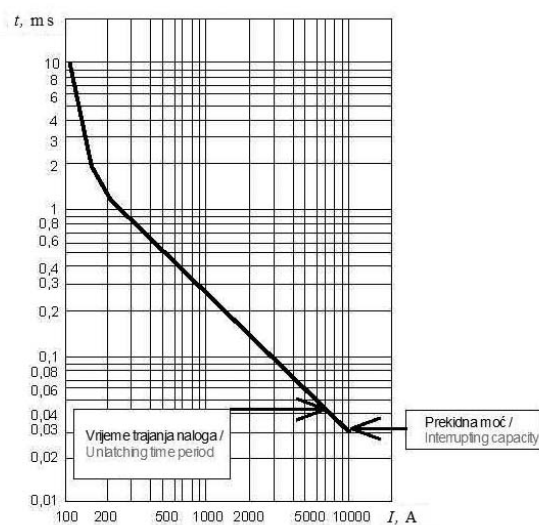
The necessary time duration for initiation (unlatching time, delatching time, pulse tripping or command time) depends on the short circuit current.

Na slikama 13 i 14 može se očitati njegova vrijednost za primjer jednog kompaktnog 400 A prekidača te jednog malog prekidača 20 A (C-karakteristika prema IEC).

In Figures 13 and 14, the values can be read for the example of a single compact 400 A circuit breaker and a small 20 A circuit breaker (C-characteristics according to IEC).



Slika 13 — I - t krivulja kompaktnog 400 A prekidača i vrijeme trajanja naloga
Figure 12 — I - t curve for a 400A compact breaker and the unlatching time period



Slika 14 — Vrijeme trajanja naloga malog prekidača 20 A (C-karakteristika)
Figure 14 — Unlatching time period for a small 20A breaker (C-characteristics)

Međutim, funkcija vremena trajanja naloga u ovisnosti o struji kratkog spoja najčešće nije dostupna u standardnim podacima NN proizvođača te je treba posebno zatražiti od proizvođača.

Tijekom korištenja ove metode javlja se problem trajanja naloga ovisno o visini struje, a struja neposredno nakon nastajanja kratkog spoja naglo, eksponencijalno raste, pa iz krivulja predloženih na slikama 13 i 14 nije moguće jednostavno očitati potrebno vrijeme trajanja naloga.

Neki proizvođači, definiraju minimalno vrijeme trajanja naloga (engl. *minimal command time*), a to je najkraće vrijeme trajanja naloga koje vrijedi za vrlo velike struje kratkog spoja kod kojih dolazi do zasićenja magnetske jezgre i armature magnetskog okidača, pa magnetska sila i trajanje naloga više ne ovisi o daljnjem porastu struje kratkog spoja.

Ako je ukupno vrijeme isklopa prekidača 2, kod struje čija je vrijednost jednaka struji prorade magnetskog okidača prekidača 1, kraće od minimalnog vremena trajanja naloga prekidača 1 postojat će potpuna selektivnost između prekidača 1 i prekidača 2 iz slike 12. Na ovaj način se, uz dosta sigurnosne zalihe, može jednostavno provjeriti lažna-strujna selektivnost.

3.5 Energetska selektivnost i selektivno ograničenje (SELLIM)

Energetska selektivnost prvenstveno se koristi za provjeru selektivnosti između NN osigurača [7], [10] i [11].

Selektivnost između NN osigurača se postiže kada posljednji osigurač u nizu propusti ukupno manji kvadrat struje tijekom pregaranja ($I^2 d t_{total}$) od kvadrata struje potrebnog za taljenje prethodnih nn osigurača ($I^2 d t_{prearcing}$) (slika 15).

However, the command time function depending on the short circuit current is most often not accessible in standard data provided by LV manufacturers and most often it is necessary to seek such information from the manufacturer.

During the use of this method, there appears the problem of time duration depending on the current value, while current directly following the occurrence of a short circuit spontaneously, exponentially grows, hence from the curves shown in Figures 13 and 14 it is not possible to simply identify the necessary unlatching time period.

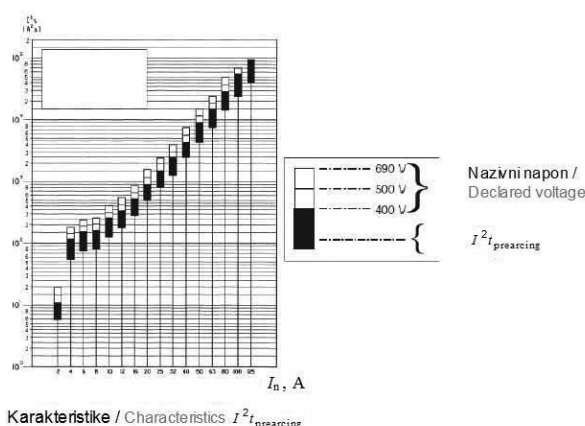
Some manufacturers define the minimal command time and this is the shortest command time that is valid for large short circuit currents where there occurs a saturation of the magnetic core and magnetic trip unit contact, hence the magnetic force and command time no longer depends on a further increase in the short circuit current.

If the total de-energization period for circuit breaker 2, for current values equal to activation currents in magnetic trip unit in circuit breaker 1, is shorter than the minimum command time for circuit breaker 1, full selectivity will occur between circuit breaker 1 and circuit breaker 2 as shown in Figure 12. In this manner, with adequate safety reserves, the false current selectivity can be verified.

3.5 Energy Selectivity and Selective Limitation

Energy selectivity is primarily used for verifying selectivity between LV fuses [7], [10] and [11].

Selectivity between LV fuses can be achieved when the last fuses in series passes less current squared during blow-out ($I^2 d t_{total}$) than the current squared necessary for melting of the previous LV fuses ($I^2 d t_{prearcing}$) (Figure 15).



Slika 15 — Karakteristike $I^2 t$ NN rastalnih osigurača tip gG prema IEC 60269
Figure 15 — Characteristics $I^2 t$ of LV fuse type gG based on IEC 60269

Ovaj način provjere se koristi i kada je u višoj razini smješten NN osigurač, a u nižoj razini NN prekidači. Tada NN prekidači ne smiju propustiti tijekom prekidanja veći kvadrat struje pregaranja od kvadrata struje potrebnog za taljenje prethodnih NN osigurača.

Selektivno ograničenje ili SELLIM (engl. *selective limitation*) nudi brojne prednosti pred ostalim vrstama selektivnosti i obično je konstrukcijski razrađena od strane proizvođača NN prekidača sa ciljem da se postigne selektivnost između različitih tipova NN prekidača, ali i da se osigura kaskadnost te smanje mehanička i termička naprezanja u instalaciji.

Ovo je poseban oblik prividno-strujne selektivnosti (oba prekidača su ograničavači) i koristi se pri velikim strujama kratkog spoja. Pod pojmom velike struje kratkog spoja podrazumijevaju se sve struje kratkog spoja koje su veće od $2I_m$, gdje je I_m struja prorade magnetskog okidača prekidača više razine. Sve ostalo su male struje kratkog spoja.

Selektivno ograničenje se temelji na principu energetske selektivnosti, tj. posljednji NN prekidač u nizu propusti ukupno manji kvadrat struje tijekom prekidanja ($I^2 d t_{total}$) od kvadrata struje potrebnog za aktiviranje prethodnih NN prekidača ($I^2 d t_{unlatch}$).

Kod ove vrste selektivnosti NN prekidač 1 iz slike 16 izveden je s produljenim vremenom trajanja naloge. Ako je u sljedećoj razini ugrađen obični prekidač-ograničavač, koji će prekinuti veliku struju kratkog spoja već u prvoj poluperiodi (< 10 ms) i propustiti mali kvadrat struje ($I^2 d t_{total}$), selektivnost će se postići.

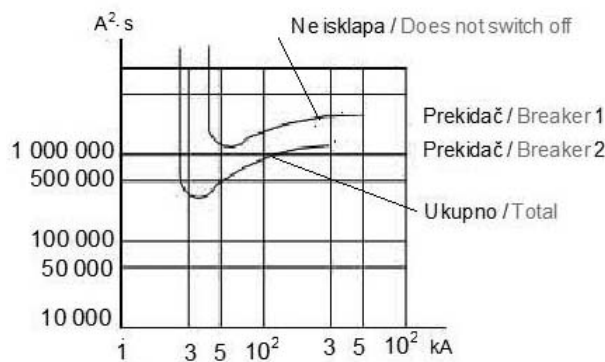
This manner of verification used when an LV fuse is installed at a higher level, while an LV circuit breaker is at a lower level. The LV circuit breaker must not allow the passing of larger blow-out current squared during interruption than the current squared necessary for melting the previous LV fuse.

Selective limitation or SELLIM offers many advantages compared to the types of selectivity and ordinarily is designed by the manufacturer of the LV circuit breaker with the aim of achieving selectivity between two various types of LV circuit breakers, and also ensures cascading as well as smaller mechanical and thermal tensions in the installation.

This is a special form of apparent current selectivity (both circuit breakers are limitators) and are used for large short circuit currents. The term of large short circuit currents include all short circuit currents greater than $2I_m$, where I_m is the activation current for the magnetic trip unit in the circuit breaker at a higher level. Everything else is considered to be smaller short circuit current.

Selective limitation is based on the principle of energy selectivity, i.e. the last LV circuit breaker in series passes less total current squared during interruption ($I^2 d t_{total}$) than the current squared necessary for activation of the previous LV circuit breaker ($I^2 d t_{unlatch}$).

For these types of selectivity, the LV circuit breaker 1 in Figure 16 is used with an extended command time. If, at the next level, a standard circuit breaker-limitator is installed, which will terminate large short circuit currents already in the first half-period (< 10 ms) and pass small currents squared ($I^2 d t_{total}$) selectivity will be achieved.



Slika 16 — Usporedba I^2t dvaju NN prekidača
Figure 16 — Comparison of I^2t for two LV breakers

Pri tom prekidač 1, bez obzira što nije isklonio, zbog mehaničkih sila koja se tijekom prekidanja velikih struja pojave među kontaktima, kratkotrajno odvaja glavne kontakte (dođe do tzv. repulzije ili odbijanja kontakata) te s tim dodatno ograniči struju kratkog spoja. Dodatno ograničenje velikih struja kratkog spoja od strane prekidača 1 omogućuje da prekidač 2 ima i manju prekidnu moć od proračunske struje kratkog spoja na mjestu kvara. To svojstvo se naziva kaskadnost zaštite, a razinu kaskadnosti između različitih tipova prekidača (uz selektivnost) definiraju proizvođači.

4 ZAKLJUČAK

Podsustavi istosmjernog razvoda i napajanja bitni su za pogon elektroenergetskih postrojenja u normalnim uvjetima i posebice u slučaju nestanka mrežnog napona te stoga trebaju biti pouzdani i sigurni.

U očuvanju vitalnih funkcija elektroenergetskih postrojenja veliku ulogu ima selektivnost zaštitnih uređaja u istosmjernom razvodu, kojom se postiže da kvar isključuju zaštitni uređaji najbliži mjestu kvara, pri čemu zaštitni uređaji prethodnih razina razvoda i na njih priključeni izvodi ostaju uključeni.

U niskonaponskim istosmjernim i izmjeničnim strujnim krugovima za prekidanje struje u slučaju kvara najčešće se koriste niskonaponski prekidači koje se prema različitim kriterijima i namjeni može razvrstati u više grupa.

Zbog brojnih prednosti u modernim podsustavima istosmjernog razvoda i napajanja najčešće se primjenjuju kompaktni i mali prekidači koji prekidaju struju kratkog spoja prije nego ona dosegne vršnu vrijednost.

Selektivnost zaštite postiže se pravilnim odabirom vrsta i rasporeda zaštitnih uređaja po razinama razvoda. Za ostvarivanje selektivnosti između dvaju zaštitnih uređaja u krugovima istosmjernog napona koriste se različiti načini postizanja selektivnosti. Tako je na primjer za provjeru selektivnosti između NN prekidača pri malim istosmjernim strujama kratkog spoja najpogodnija primjena vremenske selektivnosti. Za provjeru selektivnosti između kompaktnih i malih NN prekidača pri velikim strujama kratkog spoja moguće je kod istosmjernih, kao i kod izmjeničnih razvoda, koristiti provjeru prividno-strujne ili energetske selektivnosti.

Današnji proizvođači u katalozima NN prekidača prilažu tablice koje određuju granice selektivno-

Therefore, circuit breaker 1, regardless of not de-energizing, due to mechanical forces which, during interruption of large currents, appears between the contacts, separates the main contacts for a short period (the so-called repulsion or contact repelling occurs), and this leads to additional limiting of short circuit currents. Additional limitation of large short circuit currents by circuit breaker 1 allows circuit breaker 2 to possess a smaller interruption capacity than the calculated short circuit current at the fault location. This property is called cascade protection and the cascade level between various types of circuit breakers (with selectivity) is defined by manufacturers.

4 CONCLUSION

DC power distribution sub-systems are important for the operation of electrical power facilities in normal conditions especially in the event of the failure of grid voltage and therefore should be reliable and safe.

In preserving the vital functions of electrical power facilities, selectivity of protection devices in DC distribution systems plays a large role, and this selectivity enables the fault to be terminated by protection devices closest to the fault location, whereby the protection device at the previous distribution level and those connected to it remain operational.

In low-voltage DC and AC circuits, for interrupting the current in the event of a fault, low-voltage circuit breakers are most often used and according to various criteria and purpose, may be categorised into higher groups.

Due to the numerous advantages in modern DC power distribution systems, most often the moulded case and miniature circuit breakers are used which interrupt short circuit currents before reaching peak value.

Selectivity protection is achieved by correctly choosing the type and arrangement of protection devices at various distribution levels. For achieving selectivity between two protection devices in DC voltage circuits, various ways of achieving selectivity are used. Hence for example, in order to verify selectivity between LV circuit breakers during small DC short circuit currents, the most appropriate application is time selectivity. In order to verify selectivity between moulded case and miniature LV circuit breakers during large short circuit currents, it is possible for DC systems, as well as for AC distribution, to use verification of apparent current or energy selectivity.

Today's manufacturers in LV circuit breaker catalogues include tables that define the selectivity limit between various types of LV circuit breakers, but these tables are most often intended for verifying

sti između različitih tipova NN prekidača, ali su te tablice, najčešće, namijenjene za provjeru selektivnosti u izmjeničnim razvodima. Tablice selektivnosti prekidača, koje vrijede za izmjenične struje kratkog spoja, primjenjive su za približnu računsku provjeru selektivnosti i u istosmjernim razvodima elektroenergetskih postrojenja za određene kombinacije NN prekidača. Međutim, tablice selektivnosti ne smiju se, ni u tim slučajevima, koristiti kao sigurna potvrda postojanja selektivnosti, već je stvarno postojanje selektivnosti u realnim istosmjernim razvodima potrebno potvrditi primarnim ispitivanjima selektivnosti u elektroenergetskim postrojenjima.

selectivity in AC distribution systems. The circuit breaker selectivity tables, applicable for AC short circuit currents, are used for approximate calculation verification of selectivity also in AC power distribution facilities for certain combinations of LV circuit breakers. However, the selectivity tables must not, even in these instances, be used as a certain verification of the existence of selectivity, but the actual existence of selectivity in real DC distribution systems is to be verified using primary testing of selectivity in electrical power facilities.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] MARTINČIČ et al., Short circuit Protection in DC
 - [2] ŠKARE, J., LOVEI, A., Problemi zaštite od kratkog spoja u istosmjernim razvodima postrojenja za prijenos i distribuciju, *Energija*, god. 49(2000), broj 2
 - [3] ŠKARE, J., Analiza dinamike sustava istosmjernog napajanja u elektroenergetskim postrojenjima, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Magistarski rad, Zagreb, 2006.
 - [4] ŠTEFAN, S., Doprinos proračunu i analizi procesa prekidanja struje u ograničavačima, doktorska disertacija, 1994.
 - [5] SKOK, S., Selektivnost zaštita u sustavima istosmjernih razvoda, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Doktorska disertacija, Zagreb, 2004.
 - [6] SKOK, S., Sustavi istosmjernih razvoda u elektroenergetskim postrojenjima, Kigen d.o.o., Zagreb, 2007.
 - [7] NEREAU, J.P., Discrimination with LV power circuit-breakers, *E/CT* 201, 2001.
 - [8] MOREL, R., LV circuit-breaker breacking techniques, *E/CT* 164, 2000
 - [9] BUSSMANN, Selective Coordination
 - [10] RÉMOND, C., From current discrimination to energy discrimination, *J3E Special Merlin Gerin*, 1994
 - [11] SERPINET, M., MOREL, R., Energy-based discrimination for low-voltage protective devices, *E/CT* 167, 1994
-

Adrese autora:

Mr. sc. **Javor Škare**
jskare@koncar-inem.hr
KONČAR-Elektronika i informatika d.d.
Fallerovo šetalište 22
10000 Zagreb
Hrvatska
Miroslav Mesić, dipl.ing.
miroslav.mesic@hep.hr
HEP Operator prijenosnog sustava d.o.o.
Kupska 4
10000 Zagreb
Hrvatska

Authors' Adresses:

Javor Škare, MSc
jskare@koncar-inem.hr
KONČAR – Electronics and Informatics Inc.
Fallerovo šetalište 22
10000 Zagreb
Croatia
Miroslav Mesić, dipl. ing.
miroslav.mesic@hep.hr
HEP Transmission System Operator Ltd.
Kupska 4
10000 Zagreb
Croatia

Uredništvo primilo rukopis:
2008-12-01

Prihvaćeno:
2009-03-03

Manuscript received on:
2008-12-01

Accepted on:
2009-03-03